第 64 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 4
2023 年 7 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jul., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.04.001

# 采用光学指向系统建立天马13 m望远镜指向模型*

孙正雄[1†] 毛银盾[1] 王锦清[1,2,3] 罗 浩[1] 郑景辉[1] 王广利[1,4]

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)
(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210023)
(3 上海市空间导航与定位技术重点实验室 上海 200030)
(4 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 描述了采用光学望远镜辅助天马13 m射电望远镜进行指向测量以及建立指向误差修正模型的方法. 对于小口径望远镜, 指向校准目标源比较少, 用射电法建立指向模型难以覆盖全天区. 利用上海天文台天马13 m射电望远镜进行光学望远镜辅助射电望远镜指向测量研究, 在13 m天线背架上安装一套光学指向系统, 获得了优于3″的重复测量误差. 此外, 通过对影响天线指向因素的分析, 建立了包含8个误差项的指向误差修正模型以及光轴和电轴偏差模型. 将指向模型代入天线伺服控制系统, 对校准目标射电源进行十字扫描, 得到指向样本残差约为5″. 该研究可以为实现高精度指向建模提供一种参考方法.

**关键词** 射电望远镜, 指向模型, 光学辅助指向测量, 方法: 数据分析

**中图分类号**: P111; **文献标识码**: A



## 1 引言

射电望远镜扫描、跟踪射电源的过程中, 指向误差会严重降低接收射电源信号的强度. 一般要求指向精度优于望远镜响应波束宽度的1/10. 天马13 m射电望远镜安装的宽带制冷接收机工作频率范围为3–15 GHz, 需要满足30″的指向精度. 本文通过光学辅助指向系统建立的指向模型精度远远优于天线最高工作频率的指向误差要求. 光学指向系统在天马13 m望远镜上成功的运用和验证, 为在同一园区的天马65 m射电望远镜采用该方法建立高精度指向模型提供了充分的理论与实践经验. 天马65 m射电望远镜在最高观测频率上要求指向精度小于3″, 对于这种庞大的射电望远镜是很难实现的. 射电望远镜的传统指向误差测量是使用望远镜的主波束扫描一个已知的源, 从而确定方位和仰角轴上的指向偏移, 或者在射电望远镜的结构上安装光学望远镜系统, 用于观察目标天体, 并从光学图像确定偏移量[1]. 尽管光学指向系统限制在夜间时段使用, 但这种光学方法通常需要更少的时间得到方位角和俯仰角的偏移. 光学望远镜对于实时检测指向性能非常有用. 此外, 如果视场足够大, 光学望远镜系统还可以用于夜间对射电源的引导, 同时光学指向系统可以用于评估天线跟踪系统的稳定性和精度[2–3].

近年来, 随着指向精度要求的不断提高, 国外在一些口径大或观测频率高的射电望远镜上附加安装光学指向望远镜, 以实现射电望远镜的高精度指向观测. 相比于射电观测, 光学观测具有如下优势[4]:

(1)光学观测获得的星象位置精度高, 显著高于

2022-05-18收到原稿, 2022-07-12收到修改稿
*国家自然科学基金项目(11903068)资助
†zxsun@shao.ac.cn

射电扫描观测方式获得的目标源位置精度;

(2)通过小口径光学望远镜配备CCD (Charge-coupled Device)或CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)相机, 光学观测数据可以在“秒”量级时间内获取, 而射电望远镜的“十字扫描法”观测一般需要1 min甚至更长时间;

(3)在光学波段, 可作为观测校准目标的亮星天空分布密度大, 非常容易找到合适的星;

(4)光学指向望远镜可以实时监测射电望远镜的指向误差, 并纠正射电望远镜不可重复的指向误差, 同时可以评估射电望远镜伺服控制系统的稳定性.

本文研究了如何利用小型光学望远镜来辅助天马13 m射电望远镜进行指向测量以及建立指向修正模型. 该方法是将光学望远镜安装在天线背架上来观测光学频段的目标源, 因此可以通过大量的光学目标源来测量天线指向误差, 从而来提高天马13 m射电望远镜的指向精度. 在通过上述方法修正天马13 m射电望远镜指向误差时, 需要保持光轴和电轴之间的一致性. 在两者之间存在差异时, 需要对两轴之间的变化规律进行校正. 图1为天马13 m射电望远镜外观图.



图 1　天马13 m射电望远镜

Fig. 1　Tianma 13 m radio telescope

## 2　望远镜指向测量

### 2.1　光学指向系统

光学指向系统的安装应该满足2个条件: (1)它应该牢固地附着在射电望远镜的结构上, 以便模仿射电望远镜结构的运动和弯曲; (2)工作人员方便维保. 图2是安装在天马13 m射电望远镜上的简易光学指向系统. 光学望远镜的顶部有一个入射窗口, 安装了一个圆顶形的亚克力玻璃罩, 且配备加热电阻丝, 以减小箱体内的热梯度. 底部的CMOS相机安装在小型光学望远镜的目镜位置上, 相机旁边是一个微型工控机, 然后将光学指向系统整体安装在一个定制的很轻且硬的不锈钢箱体内, 这样能够抵御下雨和恶劣天气条件. 光学指向望远镜的有效通光口径为11 mm, 焦距为130 mm. 在天气晴朗的夜晚, 采用0.2 s的曝光时间拍摄星空, 能观测到亮于12等的目标. 选择在图2中所示的位置安装光学指向系统有两个方面考虑: 一是不用在射电望远镜主反射面板上开一个小孔, 以免破坏面板, 且不能恢复; 二是当天线俯仰角为0°时, 工作人员通过一个简短的爬梯很容易调整设备, 方便设备故障维修, 调整光学望远镜的光轴等.

通过天线伺服控制计算机控制13 m天线的转动, 使得小型光学指向系统能够指向天体, 拍摄天体图像. 根据所拍摄的天体图像反馈信息, 来调节光学望远镜的焦距, 以便得到清晰的光学图像. 在实验测试的过程中, 选择在一个晴朗的夜晚, 控制天线指向全天区不同的方向, 控制光学拍照软件进行同步拍摄, 即天线指向一个位置, 且天线的方位角和俯仰角稳定后控制光学望远镜拍摄一张星空图片[5–6]. 通过反复不断地控制射电望远镜指向全天区位置拍摄天文FITS (Flexible Image Transport System)图像, 然后处理FITS图像得到光学望远镜指向的J2000赤经和赤纬位置信息(J2000表示儒略纪元法下的2000历元), 并根据拍照的时间和射电望远镜的坐标信息计算出天线的方位角和俯仰角. 控制光学望远镜拍照的计算机是与台站的时间服务器同步的. 记录天线指向天区位置静止状态拍照时编码器的读数值, 该值与根据FITS图像解算出来的指向位置之间的差值, 即为该指向位置的指向偏

差[7–8]. 光学指向测量的数据处理流程如图3所示.



图 2 安装在天马13 m射电望远镜上的光学望远镜指向系统

Fig. 2 Optical telescope pointing system mounted on Tianma 13 m radio telescope

## 2.2 天文图像定位识别

光学望远镜相机在拍摄一张FITS图像后, 可以得到光学望远镜的光轴对应天区的中心天球坐标. 为了验证我们计算的准确性, 在射电望远镜朝向东、南、西、北4个方向分别拍摄一张FITS图, 然后上传FITS图像到Astrometry.net网站解算图像中心坐标. 图4为Astrometry.net网站解算FITS图像中心在J2000历元下的赤经(RA)和赤纬(Dec), 对比我们开发的天文定位计算软件计算出的FITS图像中心在J2000历元下的RA和Dec, 结果如表1所示, 两者基本一样.

根据拍摄的FITS天文图像, 解算出光学望远镜的光轴指向的赤经和赤纬坐标. 通过计算, 将J2000历元下的赤道坐标系信息转为当前历元下的赤道坐标系信息[5–6], 因此需要计算当前历元下的赤道坐标系目标天体时角$t$, 计算公式如下:

$$t = \mathrm{LST} - \mathrm{RA}\,, \tag{1}$$

上式中, LST为本地恒星时. 利用当前历元下的赤道坐标系目标天体时角, 可以分别计算出光学望远镜在当前历元下的地平坐标系的方位角AZ和俯仰角EL, 计算公式如下:

$$\mathrm{AZ} = \tan^{-1}\left[\frac{\cos(\mathrm{Dec})\sin t}{\sin(\mathrm{Lat})\cos(\mathrm{Dec})\cos t\cos(\mathrm{Lat})\sin(\mathrm{Dec})}\right], \tag{2}$$

$$\mathrm{EL} = \sin^{-1}[\sin(\mathrm{Dec})\sin(\mathrm{Lat}) + \cos(\mathrm{Dec})\cos(\mathrm{Lat})\cos t]\,, \tag{3}$$

其中, Lat为观测者所在的地理纬度. 将计算所得值与射电望远镜伺服系统的码盘读数值进行比较即可得到射电望远镜方位角和俯仰角的指向误差.

表 1 Astrometry.net和天文定位计算软件结果的比较

Table 1 Comparison between Astrometry.net and astronomical positioning calculation software

| | RA/Dec | East | South | West | North |
|---|---|---|---|---|---|
| Astrometry.net | RA/° | 60.1251 | 37.1402 | 12.3767 | 40.9529 |
| | Dec/° | 21.3950 | 25.6101 | 24.7423 | 36.3856 |
| Astronomical positioning calculation software | RA/° | 60.1248 | 37.1398 | 12.3762 | 40.9527 |
| | Dec/° | 21.3953 | 25.6103 | 24.7425 | 36.3858 |

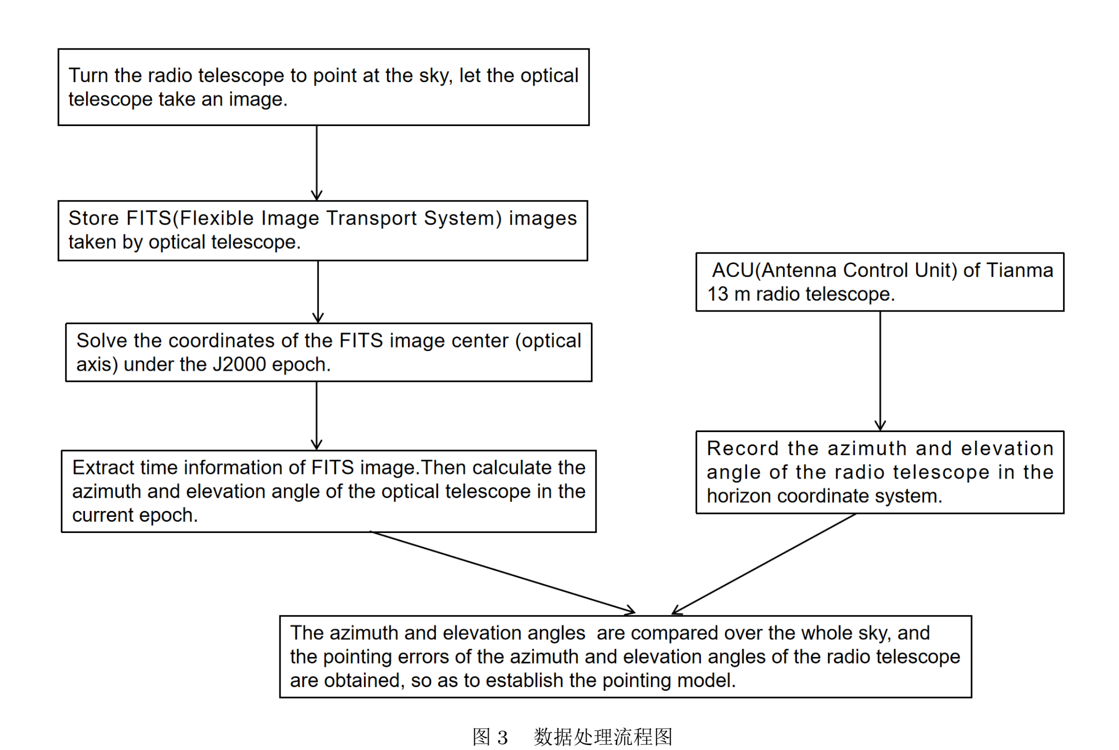



图 3 数据处理流程图

Fig. 3 Flow chart of data processing

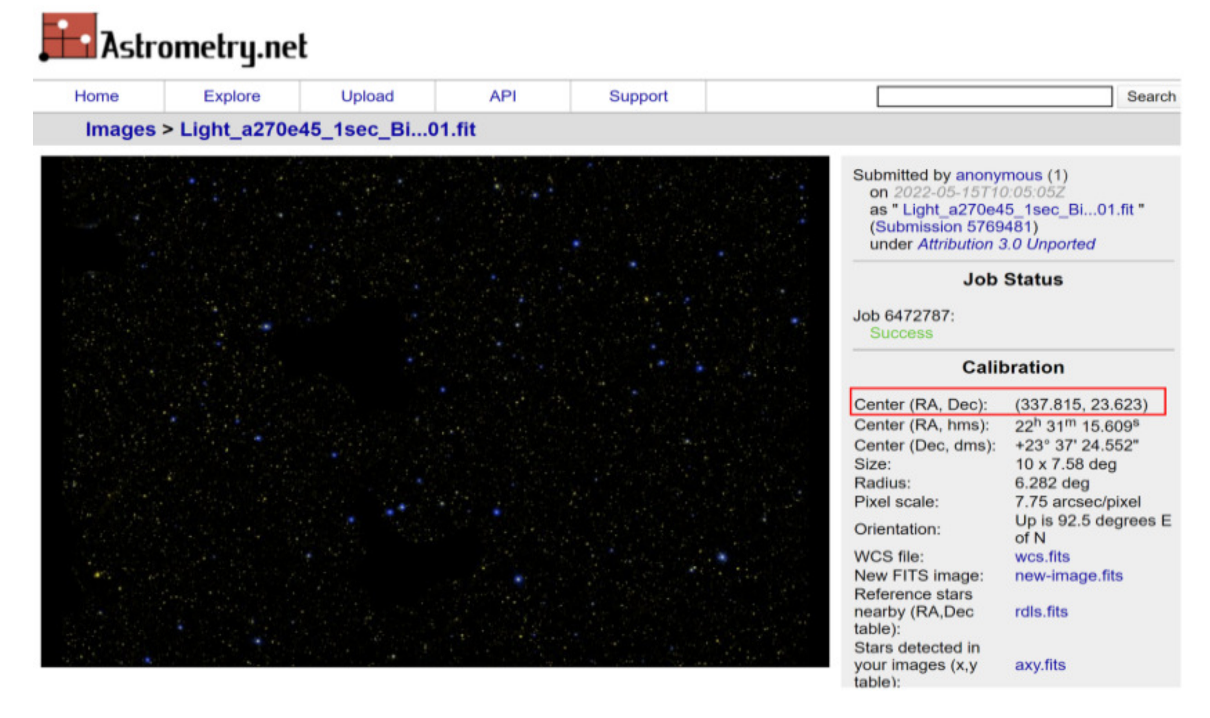



图 4 Astrometry.net网站解算FITS图像中心在J2000历元下的赤经和赤纬结果

Fig. 4 Astrometry.net website to solve the results of RA and Dec of the FITS image center in the J2000 calendar

### 2.3　重复测量误差

在采用光学望远镜辅助射电望远镜测量指向之前, 我们在一个晴朗的夜晚, 通过在同一个天线指向位置上进行多次重复试验, 来验证该方法的可重复性. 首先控制天线指向一个位置, 待天线方位角和俯仰角完全静止时, 控制光学望远镜每隔15 s拍摄一张天文图像, 在2 min时间内连续拍摄8张. 误差采用均方根rms (root mean square)表示, 计算公式如下:

$$\mathrm{rms} = \sqrt{\frac{(x_i - \overline{x})^2}{n}}\,, \tag{4}$$

上式中$x_i$为实际测量值, $\overline{x}$为$n$次测量的平均值. 在实际测量过程中我们分别在东、南、西、北4个方向进行了重复性测试. 方位角和俯仰角重复测量误差分别由$\sigma_{\mathrm{AZ}}$和$\sigma_{\mathrm{EL}}$表示, 结果如表2所示, 误差分布如图5所示, 图中纵轴$\Delta$AZ和$\Delta$EL分别表示单次测量的方位角和俯仰角误差值.

表 2　光学望远镜重复测量误差

**Table 2　Repetition measure errors of optical telescopes**

| Antenna point | AZ/° | EL/° | $\sigma_{\mathrm{AZ}}/''$ | $\sigma_{\mathrm{EL}}/''$ |
|---|---|---|---|---|
| East | 90 | 60 | 1.741 | 2.139 |
| South | 180 | 60 | 1.402 | 2.794 |
| West | 270 | 60 | 1.795 | 2.421 |
| North | 5 | 60 | 1.562 | 2.639 |

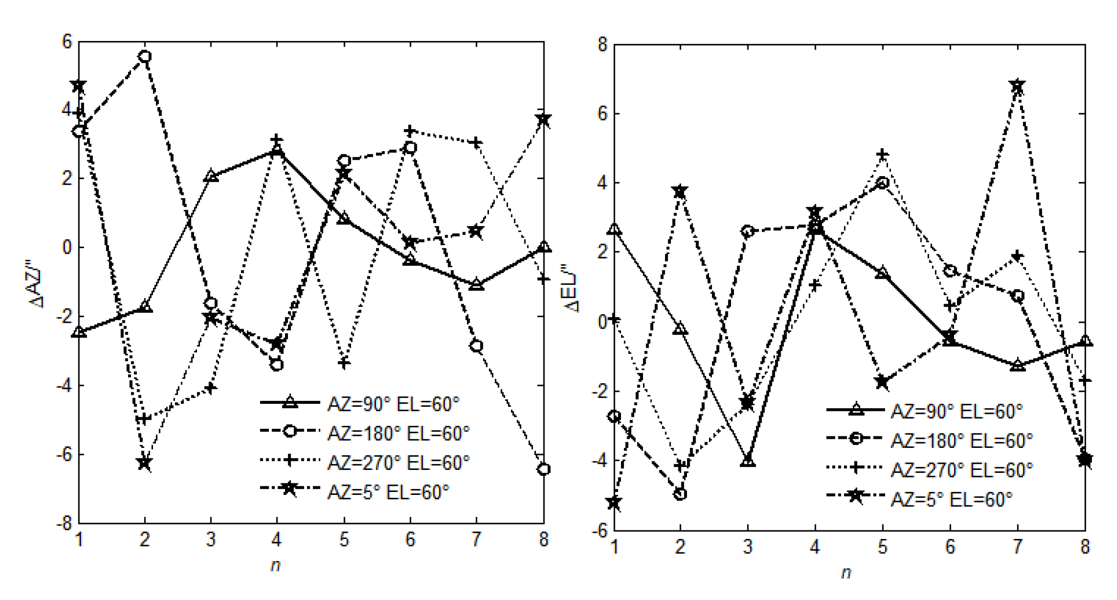



图 5　重复误差. 左: 方位角方向, 右: 俯仰角方向.

Fig. 5　Repetition error. Left: azimuth direction, right: elevation direction.

重复测量误差主要与大气视宁度、天线结构稳定性有关. 为了准确地计算出本地恒星时, 拍摄照片的控制计算机系统时间与台站NTP (Network Time Protocol)时间服务器是自动同步的. 影响光学望远镜指向测量的主要因素为大气视宁度. 由于大气湍流的影响, 星光有较强的闪烁, 光学望远镜观测恒星天体时就会有波动, 因此就会造成光学望远镜观测恒星天体目标的指向位置和天体的实际位置有偏差[9]. 目标天体的仰角越低, 光波信号经过的云层就越厚, 从而受到大气湍流的影响就越大. 由于大气视宁度, 必须通过对每颗恒星进行足够的测量来处理. 在获取指向数据样本时, 我们会在同一个时刻和同一个指向位置进行多次测量, 解算结果取平均值. 尽管我们选择在晴朗的夜晚进行观测, 在重复性试验测量的过程中, 2 min的时间内进行8次拍摄, 在这过程中难免会受热力变形和风

载的影响, 导致天线会有随机的抖动. 光学望远镜箱体内空气中的热梯度也是很麻烦的, 因为它们会导致指向误差随时间和箱体方向而变化. 通过保持光学指向系统的环境温度, 可以减小电子器件四周的热梯度.

## 3 指向误差建模

一个大型射电望远镜在制造和安装的过程中不可避免会产生各种轴系误差, 此外射电望远镜还受到重力、温度变化和大气折射等因素的影响从而产生指向误差[10]. 目前世界上各大射电望远镜通常是采用检测指向偏差样本数据, 建立指向误差改正模型, 然后将建立的改正模型加载到天线伺服控制系统中去实时修正天线指向偏差[11]. 导致射电望远镜指向偏差的因素中, 大部分具有可重复性, 对此可以通过相应的误差函数来修正.

在光学望远镜的安装过程中, 需要尽可能让光学指向系统的光轴与射电望远镜的电轴保持一致性. 然而, 电轴和光轴的准直校准需要从射电测量中获得. 初始安装光学望远镜时, 我们将射电望远镜和光学望远镜同时对准北极星, 并经过多次观测和调节光学望远镜安装的指向位置来校准电轴和光轴的一致性. 射电望远镜的电轴指向主要与卡塞格伦天线的主、副反射面和接收机位置相关, 然而由于射电望远镜在不同俯仰角上的重力变形会导致光轴和电轴有一个动态变化特性. 为了研究它们之间的变化特性, 我们通过射电望远镜和光学望远镜同时在一定俯仰角的变化范围内跟踪目标源. 在光学望远镜拍摄星空图片前, 先采用5点法修正指向误差, 即电轴指向目标源, 然后天线采用跟踪模式跟踪目标源. 待天线稳定跟踪目标源后, 通过软件设置几秒钟后的一个时刻发出“天线静止”指令, 同时光学望远镜通过拍摄软件设置相同时刻延迟0.1 s拍摄星空图像. 台站上的所有计算机时间都与时间服务器同步. 由于天线在稳定跟踪目标源时天线方位角和俯仰角变化的速度约为0.004(°)/s, 所以天线停止时几乎是没有抖动的. 光学图像拍摄延迟和系统指令延迟要小于0.2 s, 则导致的目标星(Capella)方位角变化约1″, 俯仰角变化约2″. 因此可以忽略由光学图像拍摄延迟导致的指向误差. 表3为所选择目标源表的基本信息.

**表 3 实验观测目标源的基本信息**

**Table 3 Basic information of experimental observation target sources**

| Source | RA & Dec | Magnitude |
|---|---|---|
| Venus | ∼ (planet) | −4.92 to −2.98 |
| Altair | 19:50:46.99855, +08:52:05.9563 | 0.76 |
| Arcturus | 14:15:39.67207, +19:10:56.6730 | −0.05 |
| Capella | 05:16:41.35871, +45:59:52.7693 | 0.08 |
| Mars | ∼(planet) | −2.94 to 1.86 |
| Deneb | 20:41:25.91514, +45:16:49.2197 | 1.25 |
| Vega | 18:38:56.33635, +38:47:01.2802 | 0.03 |

在实际观测时, 我们选择在一个天气晴朗的夜晚进行. 在测量天线俯仰角变化过程中光轴与电轴之间的变化关系时, 为了减小方位的影响, 最好选择一个在一定时间范围内方位角变化较小而俯仰角变化大的目标源. 图6为2021年11月20日晚上10点至次日凌晨4点, 天马13 m射电望远镜跟踪目标源Capella的方位角、俯仰角的轨迹图. 在该时间段选择观测Capella目标源可以有效减小其它因素带来的测量光轴与电轴一致性的误差. 天马13 m射电望远镜跟踪Capella目标源时, 信号采集终端采集并记录8 GHz处带宽为20 MHz的总功率值, 积分时间为1 s, 得到信号功率曲线如图7所示.

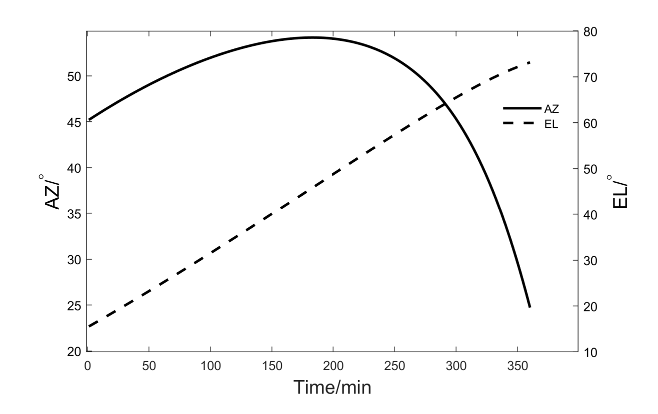



图 6 天马13 m射电望远镜跟踪Capella的轨迹图

Fig. 6 The trajectory of Tianma 13 m radio telescope tracking Capella

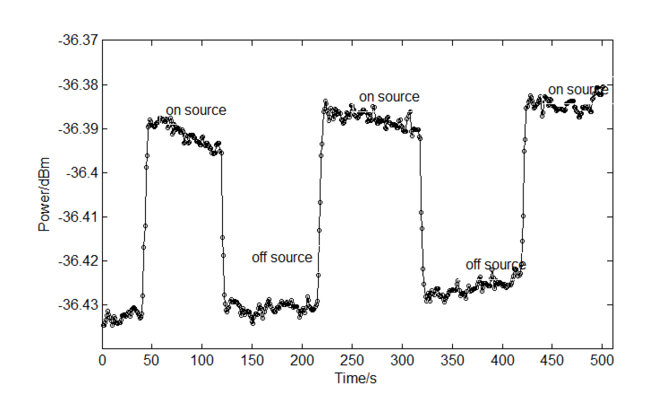



图 7 天线跟踪和偏开目标源Capella的功率变化曲线

Fig. 7 Power curve of antenna tracking and deflecting target source Capella

天马13 m射电望远镜副反射面由于在重力的作用下发生偏移, 改变了天线电轴的指向[12–13]. 在实际测量过程中, 我们将天线跟踪目标源Capella, 对射电望远镜的电轴和光学望远镜的光轴在高低俯仰角范围内进行测量. 尽管通过多次调整光学望远镜的光轴与射电望远镜电轴同轴, 但是它们之间不可能完全一致, 且射电望远镜在高低仰角范围内运动时, 会导致光电轴夹角发生变化. 通过天线副面偏移导致指向偏移的关系, 可以对实测数据进行最小二乘法拟合, 其拟合公式如下:

$$\theta = \alpha + \beta\cos(\mathrm{EL})\,, \tag{5}$$

其中$\theta$为光轴和电轴的夹角; $\alpha$为光学望远镜初始安装时, 光轴和射电望远镜的电轴之间的偏差; $\beta$为重力造成天线指向偏转因子. 由此可得天马13 m射电望远镜和安装在天线上的光学望远镜指向夹角随俯仰角的变化曲线, 如图8所示. 在拟合数据前后, 射电望远镜的电轴和光学望远镜的光轴之间夹角的残差分别为547.8″和13.7″, 结果表明光轴和电轴之间的偏差主要是由于天线重力变形引起的系统误差.

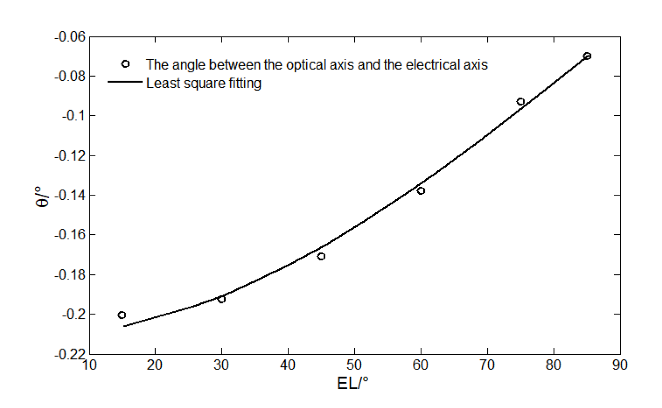



图 8 射电望远镜电轴和光学望远镜光轴之间夹角随天线俯仰角的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of the angle between the electrical axis of the radio telescope and the optical axis of the optical telescope with the antenna elevation angle

对于射电望远镜指向测量, 固有的和具有变化规律的误差可称为系统误差, 该误差都会导致天线方位或俯仰上的指向偏差. 表4给出了8参数指向修正模型的各项补偿模型及物理意义[14–15].

根据以上分析, 可建立天马13 m射电望远镜方位和俯仰方向的指向模型拟合公式如下:

$$\begin{aligned}\Delta\mathrm{AZ} = {} & \mathrm{P1} + \mathrm{P3}\tan(\mathrm{EL})\cos(\mathrm{AZ}) + \\ & \mathrm{P4}\tan(\mathrm{EL})\sin(\mathrm{AZ}) + \\ & \mathrm{P5}\tan(\mathrm{EL}) - \frac{\mathrm{P6}}{\cos(\mathrm{EL})}\,;\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\Delta\mathrm{EL} = {} & \mathrm{P2} - \mathrm{P3}\sin(\mathrm{EL}) + \mathrm{P4}\cos(\mathrm{AZ}) + \\ & \mathrm{P7}\cos(\mathrm{EL}) + \frac{\mathrm{P8}}{\tan(\mathrm{EL})}\,.\end{aligned} \tag{7}$$

表 4 指向修正模型中各项的意义

Table 4 The meaning of each item in pointing correction model

| No. | Model coefficient | Compensation | Explanation |
|---|---|---|---|
| 1 | P1 | – | Azimuth encoder fixed offset |
| 2 | P2 | – | Elevation encoder fixed offset |
| 3 | P3 | tan(EL) cos(AZ)<br>sin(EL) | Axis inclination |
| 4 | P4 | tan(EL) sin(AZ)<br>cos(AZ) | Axis inclination |
| 5 | P5 | tan(EL) | Azimuth axis and elevation axis are not positive |
| 6 | P6 | sec(EL) | Electric axis and elevation axis are not positive |
| 7 | P7 | cos(EL) | Gravity deformation |
| 8 | P8 | cot(EL) | Atmospheric residue refraction |

在分析指向测量数据精度时, 需要分别统计天线在方位方向、俯仰方向和总体的指向误差, 采用均方根值表示, 其计算公式分别如下[16–17]:

$$\delta_{\rm AZ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\Delta {\rm AZ}_i \cos({\rm EL}_i)\right]^2}{n}}\,; \tag{8}$$

$$\delta_{\rm EL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\Delta {\rm EL}_i\right]^2}{n}}\,; \tag{9}$$

$$\delta = \sqrt{\delta_{\rm AZ}^2 + \delta_{\rm EL}^2}\,. \tag{10}$$

(8)–(10)式中$\Delta{\rm AZ}_i$、$\Delta{\rm EL}_i$分别表示第$i$个指向测量点在方位和俯仰方向上的偏差; ${\rm El}_i$表示第$i$个指向测量点的俯仰角度. 我们所采用的实验样本数据是在一个晴朗的夜晚对全天区观测得到的, 天线指向测量点在方位和俯仰上的分布如图9所示. 每个实验样本数据是射电望远镜指向同一个位置, 光学望远镜进行3次拍摄解算结果的平均值. 将全天区样本数据通过(6)式和(7)式采用最小二乘法进行数据拟合. 图10表示指向模型在方位方向的拟合结果, 拟合残差为4.86″. 图11表示指向模型在俯仰方向的拟合结果, 拟合残差为5.60″. 图12表示指向模型在方位、俯仰整体的误差分布, 残差为7.42″. 图中“○”表示天线指向的偏差, “+”表示指向模型值, “×”表示残差.

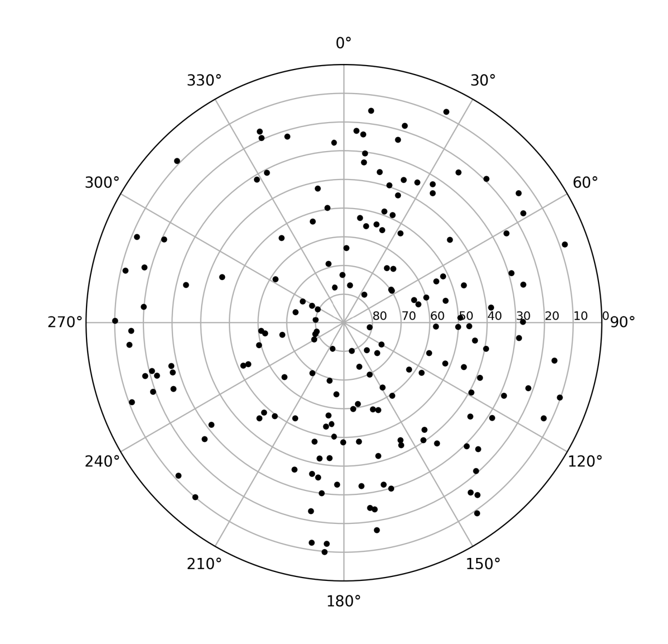



图 9 指向测量样本在天区上的分布

Fig. 9 The sky distribution of samples used in the pointing measurement

为了验证模型的准确性, 在天线伺服控制计算

机软件上加载模型偏置量, 对射电源进行“十字扫描”, 得到射电望远镜在全天区随机指向射电源的指向误差如表5所示. 根据(8)–(10)式对测量数据计算得到方位方向上的指向误差均方根为3.56″, 俯仰方向上的指向误差均方根为3.71″, 总体指向误差为5.14″.

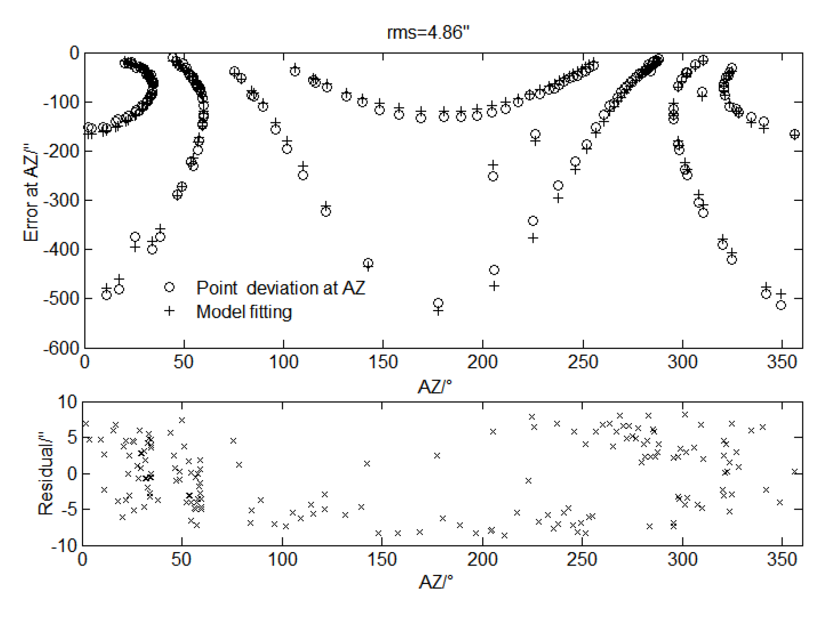



图 10 指向数据方位拟合和残差分布

Fig. 10 Distribution of point data errors and their residuals in the azimuth direction

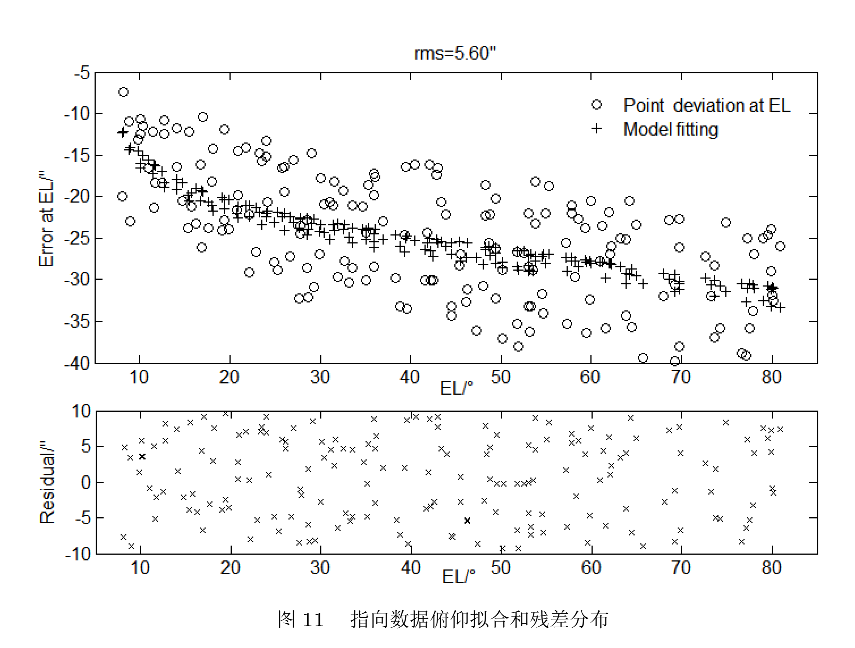



图 11 指向数据俯仰拟合和残差分布

Fig. 11 Distribution of point data errors and their residuals in the elevation direction

表 5　指向精度验证结果

Table 5　Verification of the pointing accuracy

| Scan | AZ/° | EL/° | ΔAZ/″ | ΔEL/″ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 70.59 | 10.62 | −5.51 | −3.46 |
| 2 | 83.82 | 13.73 | 6.21 | 5.23 |
| 3 | 308.48 | 16.29 | −3.50 | −2.46 |
| 4 | 285.11 | 18.92 | 6.23 | 2.57 |
| 5 | 305.43 | 22.46 | −6.85 | −0.17 |
| 6 | 78.07 | 24.34 | −7.31 | −3.83 |
| 7 | 280.00 | 28.67 | 4.57 | −4.49 |
| 8 | 82.58 | 32.99 | 0.09 | 1.24 |
| 9 | 37.22 | 37.77 | −0.92 | 1.08 |
| 10 | 36.96 | 41.04 | 0.18 | 4.28 |
| 11 | 138.97 | 44.90 | −5.47 | −3.71 |
| 12 | 211.08 | 49.06 | 3.44 | 1.37 |
| 13 | 197.92 | 52.23 | 0.42 | 4.30 |
| 14 | 24.35 | 57.50 | −4.47 | 1.24 |
| 15 | 19.22 | 59.58 | −5.12 | 0.29 |
| 16 | 300.61 | 64.31 | −2.32 | 2.60 |
| 17 | 56.41 | 69.20 | 0.98 | 2.09 |
| 18 | 118.44 | 72.98 | −8.21 | 6.61 |
| 19 | 43.84 | 75.97 | −1.03 | −8.12 |
| 20 | 334.21 | 79.14 | 4.01 | −3.24 |

## 4　总结与展望

采用光学望远镜辅助天马13 m射电望远镜建立高精度指向模型, 指向误差模型的拟合精度优于8″. 光学望远镜的重复测量误差在方位方向优于2″, 在俯仰方向优于3″, 并且具有较高的稳定性. 将指向模型代入天线控制系统测试校准目标射电源时, 测试结果表明指向模型可以很好地补偿天线指向的系统误差. 本文的研究可以为实现高精度指向建模提供一种参考方法. 目前天马13 m射电望远镜上安装的光学指向系统, 采用比较简易的设计和安装方式. 为了提高测量精度, 后期准备在光学望远镜指向系统上多做考虑. 通过使用相同且较低热膨胀系数的材料制造所有机械部件, 并采用隔热措施以减小热梯度. 箱体内空气中的热梯度也会导致光学望远镜的指向误差随时间和方向而变化, 通过将干燥空气吹入箱体进行空气循环可以消除箱体内的热梯度, 从而减小折射率的变化对光学指向望远镜的影响.

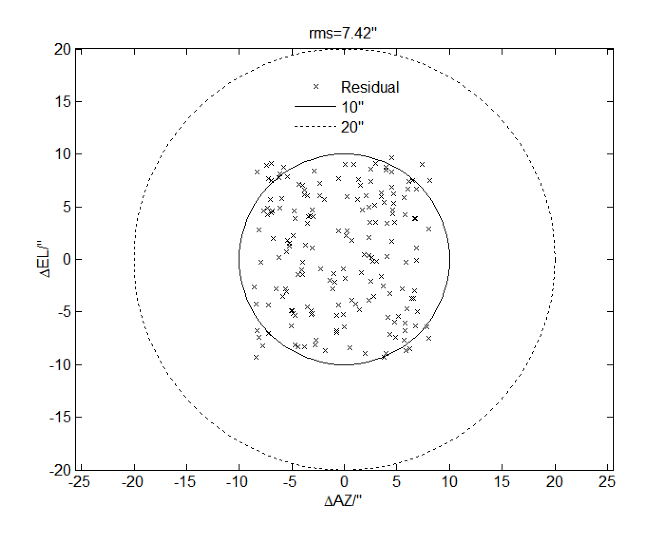



图 12　指向模型在方位、俯仰整体的误差分布

Fig. 12　Overall error distribution of the point model in azimuth and elevation directions

## 参 考 文 献


[1] Jeffrey G. An Optical Pointing System for the ALMA Prototype Antennas: ALMA Memo #288. 2000

[2] Jeffrey G M, Jacob W M B, Albert G, et al. PASP, 2006, 118: 1257

[3] Adams F C, Fatuzzo M, Holden L. PASP, 2012, 124: 913

[4] Ukita N, Ikenoue B, Saito M. PNAOJ, 2008, 11: 1

[5] 应晓科, 娄铮, 刘伟, 等. 天文学报, 2021, 62: 69

[6] Ying X K, Lou Z, Liu W, et al. ChA&A, 2022, 46: 105

[7] 何秋会, 刘利利, 汪翊鹏, 等. 南京大学学报(自然科学版), 2005, 41: 356

[8] 翟术然, 张忠萍, 张海峰, 等. 激光与红外, 2016, 46: 781

[9] 袁纵横, 张文涛. 激光与红外, 2006, 36: 272

[10] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47: 129504

[11] 喻业钊, 韩雷, 周爽, 等. 天文研究与技术, 2016, 13: 408

[12] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 1232

[13] 孙正雄, 陈岚, 王锦清. 天文学报, 2016, 57: 102

[14] 高冠男, 汪敏, 施硕彪, 等. 天文研究与技术, 2007, 4: 188

[15] 虞林峰, 王锦清, 蒋甬斌, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49: 129502
[16] 虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. 天文学报, 2015, 56: 165
[17] Yu L F, Wang J Q, Zhao R B, et al. ChA&A, 2015, 39: 524

# Using the Optical Pointing System to Build the Pointing Model of the Tianma 13 m Telescope

SUN Zheng-xiong[1] MAO Yin-dun[1] WANG Jin-qing[1,2,3] LUO Hao[1] ZHENG Jing-hui[1] WANG Guang-li[1,4]

*(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)*
*(2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)*
*(3 Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Position Techniques, Shanghai 200030)*
*(4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*

**Abstract** This paper describes the method of using the optical telescope to assist the Tianma 13 m radio telescope for pointing measurement and establishing the pointing error correction model. For small-aperture telescopes, there are few target sources for pointing and calibration, and it is difficult to establish a pointing model by radio method to cover the whole sky area. The Tianma 13 m radio telescope of Shanghai Astronomical Observatory is used to conduct optical-assisted pointing measurement research. A set of optical pointing system was installed on the back frame of Tianma 13 m antenna, which obtained a repeatable measurement accuracy better than $3''$. In addition, through the analysis of the factors affecting the antenna pointing, a pointing error correction model containing 8 error terms, as well as the optical axis and electrical axis deviation models were established. The pointing model was brought into the antenna servo control system to cross-scan the calibration target radio source, and a pointing error of about $5''$ was obtained. This research can provide a reference method for high-precision pointing modeling.

**Key words** radio telescopes, pointing model, optically assisted pointing measurements, methods: data analysis